第27卷 第6期
2015年11月

腐蚀科学与防护技术
CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY

Vol.27 No.6
Nov. 2015

经验交流

海南省变电站大气腐蚀调查

杨大宁[1] 汪 川[2] 王振尧[2] 符传福[1] 潘 辰[2] 张 帆[2]

1. 海南电力技术研究院 海口 570203;
2. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

摘要:针对海南省17个地区,33所变电站的电力设施和基础设施的常见腐蚀形式和重点腐蚀部位进行调查,对变电站腐蚀程度进行分类。对海南省各地区的大气腐蚀性进行评价,其中达到C_4级的地区为5个,并且沿海地区的腐蚀速率普遍高于内部地区。高润湿时间和高Cl^-是海南省大气腐蚀的主要诱因。缝隙腐蚀和电偶腐蚀则是该地区电力设施最常见的腐蚀形式。

关键词:电力设施 大气腐蚀 腐蚀等级 表面润湿时间 Cl^-

中图分类号:TG172 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-6495(2015)06-0617-04

1 前言

随着我国输电线路的不断建设,输电网线路及相关设施的腐蚀问题日益突出,已经严重影响电网系统安全运行[1-7]。根据美国的腐蚀调查报告,美国的电力部门腐蚀总损失高达170亿元[8]。电网系统的腐蚀防护应该结合电网的特点及其服役环境的特征,本项目针对海南省变电站的常见腐蚀形式和重点腐蚀部位及原因进行了归纳,并对海南省大气环境腐蚀性进行了评价。

海南省属于热带季风型岛屿,年平均气温在23~25 ℃,平均极端低温大部分在5 ℃以上。年平均降雨量在1600 mm以上。东湿西干明显,中部和东部沿海为湿润区,西南部沿海为半干燥区,其它地区为半湿润区。根据海南省地域特点,20l4年4~5月,分别按东、中、西线共计17个地区,33所变电站进行了腐蚀调查,其中包括220 kV变电站5座、110 kV变电站17座、35kV变电站11座。

2 海南省变电站大气腐蚀形式

调查的所有变电站均存在着不同程度的大气腐蚀问题,个别变电站腐蚀极为严重,存在着巨大安全隐患。腐蚀范围涵盖了变电站内所有设施,包括变压器、互感器、开关设备、阻波器、避雷器、端子箱等,所涉及材料有包括碳钢、镀锌钢、不锈钢、铜、铝、复合材料、钢筋混凝土及高分子材料等。以变压器为例,变压器钢制外壳的表面涂层经5 a以上运行后,普遍粉化,局部出现锈斑;呼吸口是最易被腐蚀的部位,个别变压器服役仅1 a后,呼吸口便出现锈迹。开关设备的腐蚀主要为铝合金点蚀、紧固件的缝隙腐蚀、铝-镀锌钢的电偶腐蚀以及镀锌板的腐蚀。开关设备、塔杆、安全梯、空调等一些基础设施腐蚀也极为严重,存在着极大的安全隐患。个别变电站热镀锌塔杆运行半年就出现红色锈迹,根部与水泥的结合处锈蚀更为严重;安全梯、承台等基础设施由于腐蚀出现断裂、洞穿,已无法正常使用。针对变电站不同设施的腐蚀程度进行综合评价(表1),其中已无法正常运行为严重腐蚀;影响到表面状态为一般腐蚀。西海滩、东路、东坡站等14所变电站发生严重腐蚀,鸭仔塘等19所变电站为一般腐蚀。其中缝隙腐蚀、电偶腐蚀为最主要的腐蚀形式。

3 海南省变电站大气腐蚀原因分析

3.1 海南省大气腐蚀性评价

大气腐蚀性是指大气环境(包括局部环境、微环境)引起给定基材腐蚀的能力。大气腐蚀性分为5级,其级别规定和典型金属曝晒第1 a的腐蚀速率见表2[9]。根据碳钢(Q235钢)第1a腐蚀速率来判定海南省的大气腐蚀等级。此次调研17个地区的大气腐蚀性等级为C_2~C_4级,其中达到C_4级的地区为5个,占全部的29.4%;达到C_3级的地区为11个,占全部的64.7%;达到C_2等级的地区为1个。从地理位置来看,海南省沿海地区的腐蚀速率普遍高于内部地区,东部沿海地区较为集中,海口、文昌和琼海均C_4级。

3.2 海南省大气腐蚀的原因分析

3.2.1 表面润湿时间(TOW) 海南省属于热带海洋性气候,年平均气温高,相对湿度大,雨水充沛,此次调研17个地区的润湿时间为τ_3~τ_5级(表3),

定稿日期:2015-01-06
作者简介:杨大宁,男,1969年生,高级工程师
通讯作者:汪川,E-mail:cwang@imr.ac.cn,研究方向为大气腐蚀
DOI:10.11903/1002.6495.2014.405

表1 海南省变电站腐蚀程度分类

变电站设施	严重腐蚀	一般腐蚀	重点腐蚀部位
变压器	9	24	呼吸口、散热片、油枕、紧固件处
互感器	14	19	不锈钢的膨胀节, 紧固件处, 异种金属连接处、积水处
开关设备刀闸	12	21	紧固件连接处, 异种金属连接处
端子箱	15	18	焊口处、应力集中处/把手连接处, 内部屏蔽线
基础设施	12	21	紧固件处,异种金属连接处, 积水处
总体	14	19	缝隙腐蚀、电偶腐蚀

表2 海南省大气腐蚀性评价

地区	碳钢曝晒第1 a的腐蚀速率 / μm·a^{-1}[10]	大气腐蚀性等级
海口	57.73	C_4
文昌	57.88	C_4
琼海	65.05	C_4
万宁	43.57	C_3
陵水	39.66	C_3
三亚	31.04	C_3
乐东	25.1	C_3
东方	79.75	C_4
昌江	22.93	C_2
白沙	28.75	C_3
儋州	29.37	C_3
临高	61.95	C_4
澄迈	34.52	C_3
保亭	29.35	C_3
五指山	32.28	C_3
琼中	30.45	C_3
屯昌	35.88	C_3

其中达到τ_5级的地区为10个,占全部的58.8%;达到τ_4级的地区为5个,占全部的29.4%;其余为τ_3等级。各地区差别较大,如文昌的年润湿时间最大,为8088 h,而五指山的的年润湿时间仅为1032 h,两者相差7.8倍。从地理位置来看,沿海地区的润湿时间普遍高于内陆山区。将海南各地区的碳钢年腐蚀速率与温度 (T)、相对湿度 (RH)、相对湿度大于80%的天数 (TOW)、年日照时数 (sunshine time)、降雨量 (rainfall) 和结露时间 (dew time) 进行逐步回归分析。结果发现在海南省的大气腐蚀率与相对湿度大于 80% 的天数 (TOW)、相对湿度 (RH) 及降雨量 (rainfall) 显著相关[10]。因此,在海南省高湿、热海洋大气环境下,电力设施表面极易形成水膜 (包括可见水膜和不可见水膜),并且作用时间长,极易发生大气腐蚀。

3.2.2 Cl^- 海南省大气污染较轻,各污染物含量少,以海南省万宁地区为例,万宁大气[Cl^-]远高于北京、广州、武汉、江津等地,而[SO_2]则远低于其它地区 (图3)。Cl^-沉降成为该地区大气腐蚀最主要的影响因素。吸水性盐如NaCl会增强表面电解质溶液的形成并潮解,腐蚀首先开始在NaCl液滴处并且发生丝状腐蚀,腐蚀产物以大约10 μm宽的细丝生长,活性细丝头的前部是NaCl贫化区,但细丝头的中后部是富氯的,丝状腐蚀受氧浓差电池驱动,通过受物质传输控制的Cl^-传输到细丝头,接连形成新的阳极和阴极区不断生长[11]。

对于碳钢而言,Fe^{3+}与OH^-和Cl^-形成复合物,生成氯化络合物,该物质比Fe的羟基氧化物更不稳定,进一步导致基体的腐蚀。对于不锈钢和Al等易钝化金属,氯化物悬浮颗粒沉积在其表面,通过潮解释放出的Cl^-,当Cl^-浓度超过点蚀的临界浓度[Cl^-]$_{pit}$,点蚀发生。如果阳极反应一直在局部稳定进行,将会发展成一个初期的点蚀坑。随着点蚀坑底部基体的溶解和积累,将会产生静电场,在电场力的作用下,点蚀坑外的Cl^-不断向孔内迁移,富集,在孔内形成氯化络合物并水解,从而导致H^+浓度升高,蚀坑

内溶液严重酸化,侵蚀性加剧,使坑内发生自催化过程。坑内的Fe^{3+}在高的浓度梯度及H_2所形成的微泡带动下在坑口处与OH^-反应生成沉积层,它阻碍了扩散和对流,使坑内溶液一直保持高浓度。但由于闭塞电池的腐蚀电流使周围得到了阴极保护,因而抑制了坑口周围的的腐蚀。

选取了电力设施最常见的镀锌垫片在不同地区的腐蚀锈层进行分析 (XL30FEG型扫描电镜(SEM)及能谱 (EDS)),4个地区的腐蚀锈层较薄,为针簇状和棉球状及少量的云雾状团块 (图1) ,针簇状为α-FeOOH,棉球状为γ-FeOOH,而云雾状为非晶相,这与Rigaku-D/Max-2500PC型X射线衍射仪的分析结果基本吻合,EDS分析结果表面4个锈层的均存在不同含量的Cl^- (表4)。

3.2.3 缝隙腐蚀和电偶腐蚀　在现场调查中发现,缝隙腐蚀和电偶腐蚀成为电力设施最常见的腐蚀形式。缝隙腐蚀常常出现在紧固件连接处,焊口处、抱箍缝隙处、铭牌和警示牌粘贴处等。这些部

表3 海南省各地区的润湿时间等级

地区	年均温度 T / ℃	年均湿度RH / %	RH＞80时数 / h	润湿时间等级
海口	25.1	83.5	6480	τ_5
文昌	24.8	86	8088	τ_5
琼海	24.15	85.5	7536	τ_5
万宁	25.4	84.5	4176	τ_4
陵水	25.5	82	6168	τ_5
三亚	25.25	78.5	3720	τ_4
乐东	25.05	78.5	3696	τ_4
东方	25.8	80	4536	τ_4
昌江	25.5	74	2784	τ_4
白沙	23.9	82.5	6120	τ_5
儋州	24.5	80.5	2064	τ_3
临高	24.65	83.5	6288	τ_5
澄迈	24.8	85	6840	τ_5
保亭	24.95	82	5784	τ_5
五指山	25.15	83	1032	τ_3
琼中	23.55	84	6216	τ_5
屯昌	24.45	83.5	6480	τ_5

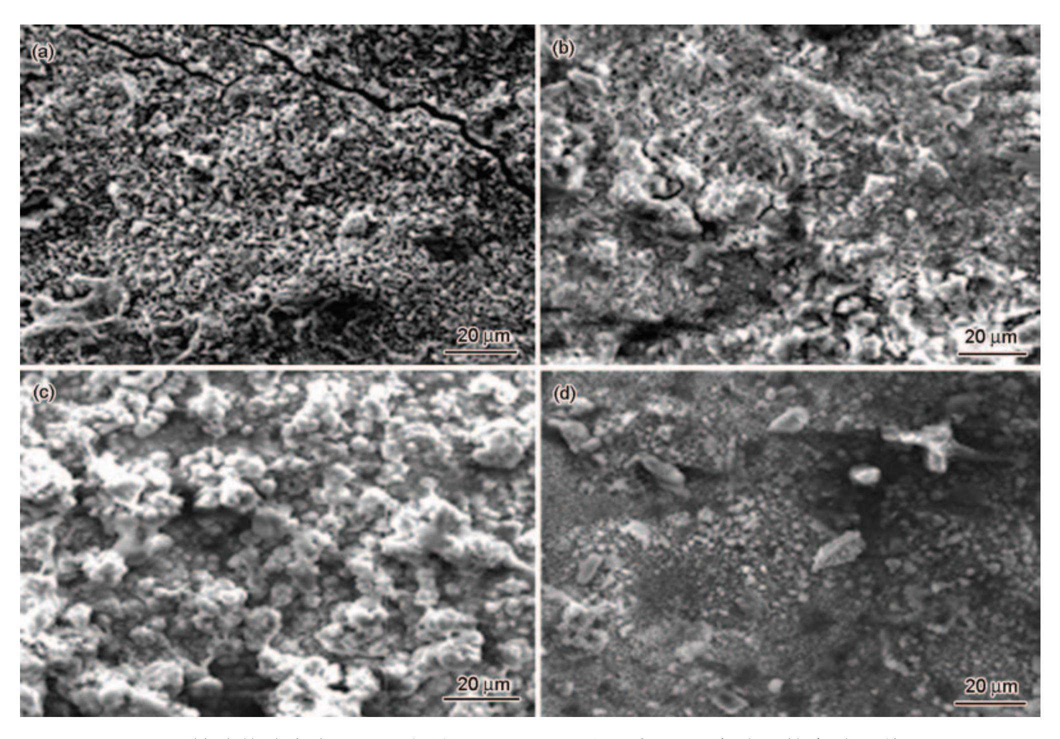


图1 镀锌垫片在海口 (a)、文昌 (b)、澄迈 (c) 和万宁 (d) 4个地区的腐蚀形貌

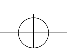


表4 镀锌垫片在不同地区腐蚀锈层的能谱分析

元素	C *K*	O *K*	Al *K*	Si *K*	S *K*	Cl *K*	Fe *K*	Zn *K*
海口	7.72	41.56	0.95	1.53	0.92	0.54	40.58	6.20
文昌	6.95	36.08	0.28	0.76	0.25	0.12	46.60	7.87
澄迈	11.54	37.46	0.83	1.99	0.45	0.63	47.09	11.54
万宁	8.28	36.25	0.45	1.28	---	0.28	39.22	14.23

位都是由于金属表面存在异物或结构上形成缝隙，当有雨水积存时，发生缝隙腐蚀，其腐蚀机理是氧浓差电池与闭塞电池自催化效应共同作用的结果，缝隙腐蚀的敏感宽度为0.02~1 mm，最易发生在紧固件等连接部位。在缝隙腐蚀初期，缝隙内外同时发生阳极溶解和阴极还原的电化学反应，当缝隙内的氧将耗尽后，缝隙内外产生氧浓度差，形成典型的氧浓差电池并产生自催化过程。由于自催化作用，大大提前了设备腐蚀时间，且很容易发展成严重的局部腐蚀，构件有效尺寸和截面积减小，力学强度降低，产生安全风险。

电偶腐蚀是造成电力设施寿命降低的另一原因，如结合滤波器上不锈钢-铝合金电偶腐蚀，断路器上铝-碳钢电偶腐蚀，刀闸上铝-镀锌钢-不锈钢电偶腐蚀等。电偶腐蚀是当2种以上不同材质的金属相互接触，由于电位不同，在电解液中形成腐蚀电池。电位较低的金属腐蚀速率较大，电位较高的金属受电化学保护。在调研中发现大量异种金属既接触又存在缝隙的情形，设备受到电偶腐蚀与缝隙腐蚀的联合作用，腐蚀程度更加严重。如隔离开关上螺栓螺杆部分采用镀锌钢，螺母采用不锈钢。由于Zn的标准电极电位−0.76 V，Fe的标准电极电位−0.44 V，而不锈钢的标准电极电位−0.1 V，与之接触的镀锌钢则加快了腐蚀速度。

此外，选材不合理，储运不规范，防护不到位也是造成变电站腐蚀的重要原因。如隔离开关的连杆、拐臂、抱箍等传动件等多为热镀锌钢，但在高湿热、高盐雾的环境中，热镀锌钢腐蚀十分严重，无法满足要求，严重影响电网安全生产。某些设备存放场地条件恶劣，长期存放不作任何防护措施，致使相关设备在未服役时就已经出现腐蚀。防护手段极为简单随意，并不能达到有效防护，往往涂装不久后又开始腐蚀。

4 结论

(1) 针对海南省17个地区，33所变电站的电力设施和基础设施的常见腐蚀形式和重点腐蚀部位进行调查，并对变电站腐蚀程度进行分类。

(2) 对海南省各地区的大气腐蚀性进行评价，其中达到C_4级的地区为5个，沿海地区的腐蚀速率普遍高于内部地区。

(3) 对海南省大气腐蚀的原因进行分析，高润湿时间和高Cl^-是海南省大气腐蚀的主要诱因。缝隙腐蚀和电偶腐蚀则是电力设施最常见的腐蚀形式。

参考文献

[1] 康灵芳. 浅谈环境对电力变压器长周期运行的影响 [J]. 动力与电气工程, 2013, (15): 126
[2] 梁敏, 张志. 变压器的防腐研究与实践 [J]. 变压器, 2003, 40(3): 22
[3] 张晓昱, 闫光宗, 欧阳杰. 电流互感器腐蚀失效原因 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(3): 198
[4] 崔文军, 吴细毛, 洪鹤. 大气污染对电力设备导体的腐蚀行为影响 [J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(10): 40
[5] 林海晴. 隔离刀闸导电杆支撑件断裂原因分析 [J]. 福建电力与电工, 2004, 24(4): 27
[6] 胡杰, 袁丽. 变电站配电箱屏蔽线腐蚀原因分析 [J]. 现代建筑电气, 2013, 4(1): 20
[7] 陈军君，李明，王军. 变电站金属构件的常见腐蚀形式及解决措施 [J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31(1): 7
[8] 柯伟. 中国腐蚀调查报告 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
[9] 王玮, 柳泽燕, 朱相荣. GB/T 19292.1-2003 金属和合金的腐蚀大气腐蚀性分类 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002
[10] 于国才, 王振尧, 陈鸿川. 海南地区气象因素对Q235 钢腐蚀的影响 [J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(12): 531
[11] Weissenrieder J, Leygraf C. *In situ* studies of filliform corrosion of iron [J]. J. Electrochem. Soc., 2004, 151(3): B165
[12] Khatak H S, Baldev R. Corrosion of Austenitic Stainless Steels: Mechanism, Mitigation and Monitoring [M]. New Delhi: Narosa Publishing House, 2002
[13] Sedriks A J. Corrosion of Stainless Steels [M]. New York: John Wiley and Sons, 1979

